

석탄광산 작업장의 비점오염부하 유출특성

NPS Pollution Loads from Coal Mining in Korea

신민환, 최용훈, 김기철, 서지연, 임경재, 최종대
Min Hwan Shin, Young Hoon Choi, Ki Chul Kim
Ji Yeon Seo, Kyoung Jae Lim, Joong Dae Choi

Abstract

환경부에서 추진하고 있는 토지피복 중분류별 비점오염부하원단위를 산정하기 위한 사업 중 나지로 분류되는 채광지역의 비점오염부하를 측정하였다. 비점오염부하는 강원도 삼척시 도계읍의 도계 작업장(석탄)과 태백시 장성동의 태백 저탄소 등 2곳의 채광지역에서 2007년 9월부터 12월까지 2회의 강우유출사상을 대상으로 측정하였다. 2회 강우사상 동안 총강수량은 도계 작업장에서 149 mm이었으며 태백 저탄소에서 201 mm이었다. 유출량은 수위계와 유량계로 5분 단위로 측정하였으며, 수질시료는 자동채수기로 2시간 간격으로 채취하였다. 수질시료는 환경부의 공정시험법에 따라 SS, BOD, CODcr, T-N, T-P, 그리고 TOC 농도를 분석하였다. 그리고 일부의 시료에 대해서는 Zn, Cb, Cu, 그리고 Pb의 농도를 분석하였다. 도계 작업장의 유량가중평균농도는 갱내수의 수질에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 도계작업장의 일평균유량가중평균농도는 SS 86.3 ~ 94.9 mg/l, BOD 3.8 ~ 7.6 mg/l, COD 26.9 ~ 51.6 mg/l, T-N 1.5 ~ 2.1 mg/l, T-P 0.2 mg/l 그리고 TOC 1.8 ~ 2.3 mg/l로 나타났다. 태백 저탄소의 일평균유량가중평균농도는 SS 16.5 ~ 66.6 mg/l, BOD 7.4 ~ 9.8 mg/l, COD 41.1 ~ 66.7 mg/l, T-N 0.7 ~ 1.1 mg/l, T-P 0.2 mg/l 그리고 TOC 1.7 ~ 2.6mg/l로 나타났다. 중금속의 농도는 모든 시료에서 환경부의 배출허용기준농도보다 낮게 나타나거나 검출되지 않았다. 도계 작업장의 일오염부하는 SS 1,368.8 ~ 1,984.1 kg/day, BOD 56.6 ~ 128.9 kg/day, COD 385.7 ~ 933.7 kg/day, T-N 23.4 ~ 44.5 kg/day, T-P 2.1 ~ 4.8 kg/day 그리고 TOC 24.3 ~ 39.3 kg/day이었다. 태백 저탄소의 일오염부하는 SS 8.2 ~ 162.1 kg/day, BOD 2.6 ~ 15.3 kg/day, COD 13.8 ~ 83.6 kg/day, T-N 0.2 ~ 3.1 kg/day, T-P 0.1 ~ 0.6 kg/day 그리고 TOC 0.7 ~ 4.4kg/day로 나타났다. 본 연구는 2회의 강우유출사상에 대하여 측정된 자료이므로 연평균농도나 연평균오염부하로 활용하기는 어렵다. 그러나 석탄광산지역의 비점오염부하를 이해하는데 활용할 수 있으며 또한 장기적인 연구자료로 활용하여 석탄광산지역의 비점오염원단위의 산정에 유용한 자료로 활용할 수 있다.

핵심용어: 토지분류, 채광지역, 석탄광산, 비점오염부하, 모니터링

*정회원 · 강원대학교 지역건설공학전공 · E-mail : waterlove@kangwon.ac.kr
**비회원 · 강원대학교 지역건설공학전공 · E-mail : tlemjin@nate.com
***비회원 · 강원대학교 지역건설공학전공 · E-mail : kchangnim@nate.com
****비회원 · 강원대학교 지역건설공학전공 · E-mail : tjwidus01@nate.com
*****정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · E-mail : kjlim@kangwon.ac.kr
*****정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · E-mail : jdchoi@kangwon.ac.kr

1. 서론

우리나라의 비점오염원은 전체 수질오염원의 42~69%로 추정하고 있으며, 2015년에는 65~70%로 증가할 것으로 예상하고 있다(2003환경부). 수질오염에 미치는 비점오염원의 비중이 커지면서 정부는 2007년에 비점오염원의 비율이 상대적으로 높은 지역을 비점오염원 특별관리지역으로 지정하여 비점오염원 부하의 저감을 위한 전방위적인 노력을 수행하고 있다. 이러한 비점오염원은 점오염원과 달리 오염물의 종류, 독성, 발생량 그리고 오염물들이 인간과 동식물에게 미치는 영향을 명확하게 판단하기가 어렵다(최, 1997). 또한 비점오염원은 강우강도, 강우지속시간, 강우수질, 유달거리, 개발지역의 유무 등에 따라 유역에 미치는 영향의 정도도 달라진다(최, 1999). 미국의 경우 비점오염원의 중요성을 인식하여 1970년대부터 비점오염원 연구를 해왔고, 자료도 많이 축적하였으며(USEPA, 1983) 현재도 지속적으로 연구가 이루어지고 있다. 그러나 미국의 오염총량제를 위한 자료로서는 부족한 점이 많아 추가적인 자료를 습득하기 위한 모니터링 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 우리나라도 수질오염에 대한 대책들이 성공하기 위해서는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원이 어디서 얼마나 발생하는지에 대한 정량적인 연구와 어느 정도 감측가능한지에 대한 연구가 이루어져야 한다(이, 2002; 박, 2001).

환경부는 전국의 토지를 대분류, 중분류 및 세분류로 구분하고, 중분류 지목별로 발생부하, 할당부하 및 삭감부하 등의 비점오염부하를 정량적으로 산정하여 오염총량제에 활용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 현재까지 우리나라에서 수행된 유역단위의 비점오염부하를 산정하기 위한 모니터링은 유역에서 발생하는 오염부하의 규모를 정량화하기에는 유용하지만, 중분류 지목별 토지이용에서 발생하는 비점오염부하와 원단위를 산정하기에는 비효과적이다. 이를 보완하기 위해서는 토지분류체계의 지목별로 장기적인 모니터링을 통해 비점오염부하의 정량화가 이루어질 필요가 있다(신, 2007). 특히, 가행광산지역은 유역단위나 지목별 오염부하를 측정할 연구가 거의 수행되지 못하였기 때문에 오염총량제에 활용할 수 있는 자료가 거의 없다. 오염총량제의 합리적인 추진을 위해서는 가행광산지역의 비점오염부하를 측정하는 연구가 시급히 요청되고 있다. 따라서 본 연구는 토지분류 중분류 지목 중 석탄광산 노외 작업장의 비점오염부하 유출특성을 예비조사하기 위한 목적으로 수행되었다. 본 연구에서 수립된 자료와 분석결과는 오염총량관리제의 토지피복분류별 비점오염부하산정, 오염저감기술 개발 등에 필요한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

우리나라의 가행광산은 국제경쟁력의 부족으로 매년 규모가 축소되어 오고 있으며 현재는 7개의 탄광만이 운영되고 있다(광해방지사업단, 2007). 이들 가행광산 중 강원도 삼척시 도계읍에 위치한 석탄광산 노외작업장(DCM, Dogye coal mine)과 태백시 장성동에 위치한 석탄광산 저탄소(TCM, Taeback coal mine)를 선정하여 비점오염부하를 2007년 9월 14일부터 12월 8일까지 측정하였다. 도계읍의 석탄광산 작업장의 모니터링 지점 좌표는 북위(N) 37°13'30.12", 동경(E) 129°02'38.73"이며, 유역면적은 0.15 km²이다. 도계 작업장의 대부분은 채탄 작업을 위한 갱구입구의 작업지역이다. 작업지역은 콘크리트로 포장되어 있고, 채광작업을 위한 광차와 기타 시설물, 작업차량의 세류시설 등으로 구성되어 있다. 또한 작업지역의 도로는 주민들이 이용할 수 있어 민간인 차량들의 운행이 많다. 작업지역의 상부는 가파른 산림이며 산 정상부에는 채탄작업시 발생한 광미와 광재를 보관하는 광재댐이 있다. 이들 지역에서 배출되는 작업용수, 우수유출수 및 갱내수

를 배수하기 위한 배수로가 설치되어 있으며 모니터링은 이 배수로의 하류부에서 수행되었다.

태백시 장성동 석탄저탄소의 모니터링 지점 좌표는 북위(N) 37°13'12.75", 동경(E) 129°02'36.27"이며, 유역면적은 0.12 km²이다. 저탄소는 철암역을 통하여 전국으로 출하되는 석탄의 저장, 운반 및 상차작업, 정부비축연탄의 저장, 그리고 석탄갱에서 배출되는 광미와 광채를 일시적으로 저장하는 역할을 담당하고 있는 지역이다. 본 연구에서 비점오염부하를 모니터링하는 지역은 정부비축연탄저장지역, 일반저탄지역, 주변의 산림지역, 저탄소 작업차량의 진입도로, 그리고 일부의 관리시설이 포함되어 있다. 정부비축연탄은 유실 등의 손실과 환경오염을 최소화하기 위하여 비닐 덮개로 덮여 보관되고 있다. 저탄소에는 우수유출수를 배수하기 위한 콘크리트 배수로가 설치되어 있다. 배수로의 중간에는 침사지가 설치되어 있어 일부의 유사를 제거할 수 있는 기능이 있다. 유출량과 비점오염물질의 농도는 배수로의 출구부분에서 측정하였다.

2.2 유량산정 및 수질특성

도계 작업장의 모니터링 지점에는 전자식 자동수위계를 설치하여 5분 간격으로 수위를 측정하였다. 또한 수위와 유량을 동시에 측정하여 수위-유량곡선을 도출하였다. 수위계로 측정된 수위는 수위-유량곡선을 이용하여 유량으로 환산하였다. 태백 저탄소 모니터링 지점에는 유량계(유속과 수위 동시 측정 후 유량으로 환산)를 설치하고 15분 간격으로 유량을 측정하였다. 각각의 모니터링 지점에는 자동수질시료채수기를 설치하고 수질시료를 채수하였다. 상시 흐름이 있는 도계 작업장의 배수로에서는 강우시 2시간 간격으로 채수하였으며 평시에도 일부 수질시료를 채수하였다. 도계작업장의 배수로에서는 총 49점의 수질시료를 채수하여 분석하였다. 태백 저탄소의 배수로는 강우시만 유출이 발생하기 때문에 강우유출이 발생할 때만 2시간 간격으로 채수하여 총 18점의 수질시료를 채수하였다. 채수된 수질시료는 환경부에서 제정한 수질공정시험법의 체반규정(환경부, 2005)에 따라 SS, BOD, COD_{Cr}, T-N, T-P, 그리고 TOC를 분석하였다. 또한 일부의 시료에 대해서는 Zn, Cb, Cu, 그리고 Pb의 농도를 분석하였다.

도계 작업장의 배수로는 갯내수가 함께 배수되기 때문에 상시 흐름이 있다. 따라서 도계 작업장에서는 강우기간 동안 유량가중평균농도를 산정하고 비점오염부하를 구하였다. 태백 저탄소의 배수로로는 강우시만 유출이 발생하므로 강우사상별 EMC(event mean concentration)을 산정하고 비점오염부하를 구했다. 유량가중평균농도와 EMC는 모두 유량을 반영하여 평균농도를 구하나 유량가중평균농도는 강우사상의 존재여부에 관계없이 일정한 기간 동안의 평균농도를 의미하는 반면 EMC는 하나의 강우사상으로 발생하는 유출시점부터 종점사이의 평균농도를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가행광산지역의 유출특성

도계 작업장의 배수로는 강우유출수 뿐만 아니라 갯내수, 작업장의 청소용수, 시설관리용수, 그리고 호우시에는 산림유출수 등이 함께 배수된다. 갯내수로 인하여 도계 작업장의 배수로는 비강우시에도 항상 일정량의 유출이 발생하고 있다. 비강우시의 배수로 유출량은 광부의 근무교대시간과 작업장의 지하수 용출량에 따라 변하였다. 모니터링 기간 동안 도계 작업장에는 2007년 9월 14일 17시~9월 15일 09시 사이와 9월 16일 08시~9월 17일 04시 사이 등 2회의 강우사상이 있었다.

두 번의 강우사상 동안 총강우량은 149 mm, 평균 강우강도는 4.14 mm/hr, 그리고 총유출량은 27,930 m³으로 나타났다. 태백 저탄소 지역도 도계 작업장과 동일한 시간에 2회의 강우사상으로 2회의 유출이 발생하였다. 두 번의 강우사상 동안의 총강우량은 201 mm이었으며, 총유출량은 4,256 m³으로 측정되었다. 태백저탄소에서는 작은 강우강도의 강우시에는 유출이 발생하지 않았으나 강우강도가 높았을 때만 유출이 발생하였다. 태백 저탄소는 강우시 유출사상이 잘 측정되었기 때문에 수문곡선과 오염부하곡선을 비교적 잘 나타낼 수 있었다. 두 지역의 일별 강우량과 유출량은 Table 1과 같다.

Table 1. Daily rainfall and runoff volume of the 2 monitoring sites

Mine	DCM (Dogye Coal Mine)		TCM (Taebak Coal Mine)	
Date	Rainfall (mm/d)	Runoff (m ³ /d)	Rainfall (mm/d)	Runoff (m ³ /d)
2007-Sep-14	32	13,416.3	32	480.5
2007-Sep-15	55	18,568.5	55	2,457.8
2007-Sep-16	51	17,114.4	51	566.2
2007-Sep-17	11	22,766.4	11	656.8

3.2 도계 작업장과 태백 저탄소 유출수의 비점오염원 농도특성

도계 작업장 배수로의 유출량과 비점오염원 수질농도는 갯내수의 영향을 많이 받고 있기 때문에 강우량의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 배수로의 유출량은 강우기간 동안보다 강우 후 일정한 시간이 지난 후 증가하였다. 이는 지표층 침투한 강우수가 지하를 통하여 갯내수로 용출되는데 일정한 시간이 소요되기 때문인 것으로 사료된다. 본 지역에 대한 모니터링이 지속되면 강우사상 후 지하수 용출과의 관계를 분석하여 강우가 지하수의 용출량에 미치는 영향을 파악할 수 있을 것으로 판단되었다. 도계 작업장의 비점오염농도들을 신뢰성있게 조사하기 위해서는 강우유출수, 갯내수, 작업장의 청소용수 등의 수량과 수질을 정확하게 파악할 수 있어야 한다. 강우가 많아 주변의 산림에서 유출수가 발생한다면 산림유출수의 수량과 수질도 별도로 측정할 필요가 있다. 그러나 산림유출수는 강우강도가 매우 높고 강우지속시간이 상당한 시간 이상 지속될 때만 가능하기 때문에 일반적인 강우에서는 발생하지 않을 것으로 판단되고 있다. 본 조사기간 동안 발생한 강우에서는 산림유출수가 발생하지 않았다. 향후 도계 작업장을 정밀히 모니터링하며 각 유출원별로 수량과 농도를 측정하여 강우유출사상별, 강우강도(계급)별, 순별(10일단위) 혹은 월별 유량가중평균농도를 산정할 필요가 있다.

태백 저탄소는 강우시에만 유출이 발생하기 때문에 저탄소의 비점오염부하를 측정하기 위한 유출수량과 수질시료를 적절하게 측정할 수 있었다. 태백 저탄소 유역의 상당부분이 산림으로 구성되어 있으나 본 조사기간 동안의 강우에서는 산림유출수가 발생하지 않았다. 따라서 측정된 유출수와 비점오염물질 농도는 순수저탄소에서 발생하였기 때문에 2회의 강우사상으로 발생한 비점오염부하의 유량가중평균농도(EMC)를 산정할 수 있었다. 이들 EMC 자료는 석탄저탄소의 비점오염원 오염부하량을 산정하는데 중요한 자료로 이용될 수 있다.

Table 2. Flow weighted mean concentration during the 2 rainfall events <Unit: mg/l>

DCM (Dogye Coal Mine)							TCM (Taeback Coal Mine)						
Time	SS	BOD	COD	T-N	T-P	TOC	Time	SS	BOD	COD	T-N	T-P	TOC
09/14 17:00~ 09/15 09:00	94.9	7.6	51.6	1.5	0.2	2.3	09/14 17:00~ 09/16 06:00	66.6	7.4	41.1	1.1	0.2	1.7
09/16 08:00~ 09/17 04:00	86.3	3.8	26.9	2.1	0.2	1.8	09/16 08:00~ 09/17 11:00	16.5	9.8	66.7	0.7	0.2	2.6

3.3 가행광산지역의 일오염부하특성

두 번의 강우로 발생한 유출사상의 유출량과 수질농도를 이용하여 도계 작업장과 태백 저탄소의 일오염부하를 산정하였다. 두 번의 유출사상 동안 도계 작업장의 일오염부하는 SS 1,368.8 ~ 1,984.1 kg/day, BOD 56.6 ~ 128.9 kg/day, COD 385.7 ~ 933.7 kg/day, T-N 23.4 ~ 44.5 kg/day, T-P 2.1 ~ 4.8 kg/day 그리고 TOC 24.3 ~ 39.3 kg/day로 나타났다. 태백 저탄소의 일오염부하는 SS 8.2 ~ 162.1 kg/day, BOD 2.6 ~ 15.3 kg/day, COD 13.8 ~ 83.6 kg/day, T-N 0.2 ~ 3.1 kg/day, T-P 0.1 ~ 0.6 kg/day 그리고 TOC 0.7 ~ 4.4 kg/day로 나타났다. 태백 저탄소보다는 도계 작업장의 비점오염부하가 높게 나타났다. 이는 도계 작업장에서는 지속적으로 청소용수 및 작업용수가 발생하였고 또한 지하용출수를 양수하여 배출하는 갯내수에 상당한 양의 비점오염물질이 포함되었기 때문인 것으로 판단되었다. 가행광산의 모니터링이 지속되면서 각 오염원별 오염부하를 정량화하여 석탄광산 작업장과 저탄소에서 발생하는 비점오염부하를 산정할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

4. 결론

토지분류체계별 비점오염부하를 측정하는 연구의 일환으로 가행광산 2곳의 유출수와 수질을 2007년 9월부터 12월까지 2회의 강우유출사상이 있었다. 가행광산은 강원도 삼척시 도계의 석탄채굴갱의 작업장 (도계 작업장)과 태백시 장성동의 석탄 저탄장(태백저탄장)이다. 강우유출사상은 2007년 9월 14일 17시 ~ 9월 15일 09시 사이와 9월 16일 08시 ~ 9월 17일 04시 사이에 발생하였다. 두 번의 강우사상 동안 도계 작업장의 총강우량은 149 mm이었으며 태백 저탄소의 총강우량은 201 mm이었다. 관측기간 동안 측정된 결과는 다음과 같다.

- 1) 도계 작업장의 강우시 유출량은 강우량보다는 갯내수 배출량에 지배를 받았다. 강우유출을 포함한 도계 작업장의 일유출량은 13,416.3 ~ 22,766.4 m³이었다. 태백저탄소의 유출량은 480.5 ~ 2,457.8 m³이었다.
- 2) 도계 작업장의 유량가중평균농도는 갯내수의 수질에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 도계 작업장의 일평균유량가중평균농도는 SS 86.3 ~ 94.9 mg/l, BOD 3.8 ~ 7.6 mg/l, COD 26.9 ~ 51.6 mg/l, T-N 1.5 ~ 2.1 mg/l, T-P 0.2 mg/l 그리고 TOC 1.8 ~ 2.3 mg/l로 나타났다. 태백 저탄소의 일평균유량가중평균농도는 SS 16.5 ~ 66.6 mg/l, BOD 7.4 ~ 9.8 mg/l, COD 41.1 ~ 66.7 mg/l, T-N 0.7 ~ 1.1 mg/l, T-P 0.2 mg/l 그리고 TOC 1.7 ~ 2.6mg/l로 나타났다. 일부의 수질시료를 대상으로 수행한 중금속 농도분석결과 모든 시료에서 환경부의 배출허

용기준농도보다 낮게 나타나거나 검출되지 않았다.

- 3) 도계 작업장의 일오염부하는 SS 1,368.8 ~ 1,984.1 kg/day, BOD 56.6 ~ 128.9 kg/day, COD 385.7 ~ 933.7 kg/day, T-N 23.4 ~ 44.5 kg/day, T-P 2.1 ~ 4.8 kg/day 그리고 TOC 24.3 ~ 39.3 kg/day이었다. 태백 저탄소의 일오염부하는 SS 8.2 ~ 162.1 kg/day, BOD 2.6 ~ 15.3 kg/day, COD 13.8 ~ 83.6 kg/day, T-N 0.2 ~ 3.1 kg/day, T-P 0.1 ~ 0.6 kg/day 그리고 TOC 0.7 ~ 4.4kg/day로 나타났다.
- 4) 본 연구는 2회의 강우유출사상에 대하여 측정한 자료이므로 연평균농도나 연평균오염부하로 활용하기는 어렵다. 그러나 석탄광산지역의 비점오염부하를 이해하는데 활용할 수 있으며 또한 장기적인 연구자료로 활용하여 석탄광산지역의 비점오염원단위의 산정에 유용한 자료로 활용할 수 있다.

감 사 의 글

본 연구는 2007년도 한강수계관리위원회(한강유역환경청)에서 시행한 환경기초조사사업 연구결과 중의 일부로 연구지원에 감사한다. 또한 일부의 강원대학교 친환경건설산업인력양성사업단(2007년도 2단계 BK21) 사업에 의하여 지원되었다.

참 고 문 헌

1. 환경부 (2003). 비점오염원관리 업무 편람.
2. 최종대(1997). 농촌유역의 관리가 비점원 오염물질의 하천유입에 미치는 영향, 농촌개발연구, 1(1), pp. 91-107.
3. 최종대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 32(4), pp. 501-510.
4. U. S. EPA.(1983). Result of the Nationwide Urban Runoff Program, Vol. 1, Final Report, Water Planning Division, U. S. EPA. Washington DC.
5. 이현동, 배철호(2002). 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안, 환경물환경학회지 18(6), pp. 569-576.
6. 박석순, 나유미, 나은혜(2001). 과학적인 수질관리를 위한 오염총량관리제도의 추진방안, 환경영향평가, 10(2), pp. 157-165
7. 신민환, 신용철, 허성구, 임경재, 최종대(2007). 농업 및 산림유역의 강우유출수 유량가중평균농도 분석, 한국농공학회논문집, 49(6), pp. 3-9
8. 광해방지사업단(2007). www.kmrc.or.kr
9. 환경부 (2005). 수질오염공정시험법.
10. 김이형, 강주현(2004). 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, 한국물환경학회지, 20(6), pp. 631-640.